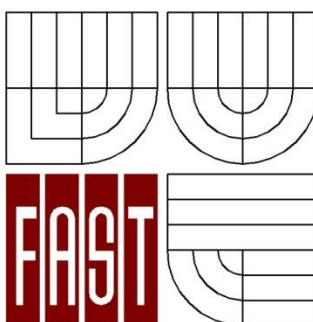




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A**  
**DÍLCŮ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND  
COMPONENTS

# **STUDIUM DISPERGACE UHLÍKOVÝCH NANOTRUBÍČEK V CEMENTOVÝCH KOMPOZITECH**

STUDY OF DISPERSION OF CARBON NANOTUBES IN CEMENT COMPOSITES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**KAMILA MICHNOVÁ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.**

Brno 2015



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Kamila Michnová
<b>Název</b>	Studium dispergace uhlíkových nanotrubiček v cementových kompozitech
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2014
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **Podklady a literatura**

- Balaguru P. N., Chong K.: Nanotechnology and concrete: research opportunities, in: Proceedings of ACI Session on Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives, Denver, USA, 2006, pp. 15–28.
- Raki L., Beaudion J., Alizadeh R., Makar J., Sato T.: Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology. Materials 2010, 3.
- Grobert N.: Carbon nanotubes becoming clean. Mater Today 2007, 10 (1–2), pp. 28–35.
- Popov V.N.: Carbon nanotubes: properties and application. Mater Sci Eng R, 2004; 43, pp. 61–102.
- Wong E. W., Sheehan P. E., Lieber C. M.: Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes. Science 1997, 277 (5334), pp. 1971–1975.
- Yazdanbakhsh A., Grasley Z., Tyson B., Abu Al-Rub R. K.: Distribution of carbon nanofibers and nanotubes in cementitious composites. Transp Res Rec, 2010, 2142, pp. 89–95.
- Abu Al-Rub R.K., Tyson B.M., Yazdanbakhsh A., Grasley Z.: Mechanical properties of nanocomposite cement incorporating surface-treated and untreated carbon nanotubes and carbon nanofibers. ASCE J Nanomech Micromech, 2012, 2(1), pp. 1–6.

## **Zásady pro vypracování**

V teoretické části bakalářské práce proveďte rešerši informací o možnostech užití uhlíkových nanotrubiček v cementových kompozitech.

Uveďte informace o povrchově aktivních látkách vhodných pro dispergaci nanočástic.

Uveďte zdravotní rizika nanočástic.

V praktické části bakalářské práce proveďte dispergaci uhlíkových nanotrubiček v roztoku pomocí různých povrchově aktivních látek.

Sledujte rozptýlení uhlíkových nanotrubiček v roztoku pomocí UV-Vis spektrometru a mikroskopu.

Zhodnoťte vhodnost povrchově aktivních látek pro dispergaci uhlíkových nanotrubiček v roztoku.

## **Struktura bakalářské/diplomové práce**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Uhlíkové nanotrubičky mají schopnost vylepšovat mechanické i fyzikální vlastnosti cementových kompozitních materiálů. Jejich uvedení do průmyslové výroby brání několik překážek. Jedná se především o problematiku efektivního zakomponování do matrice, zdravotní a ekologická rizika. Experimentální část práce se zabývá problematikou dispergace uhlíkových nanotrubiček ve vodném roztoku a jejich následným zapojení do struktury cementové matrice.

## **Klíčová slova**

Uhlíkové nanotrubičky, cementová matrice, dispergace, nanotoxicita

## **Abstract**

Carbon nanotubes have the ability to improve the mechanical and physical properties of cement composites. However, their introduction into industrial utilization is hampered by several obstacles. It primarily involves the effective incorporation into the cement matrix, health and ecological risks. The experimental part of the work deals with the dispersing carbon nanotubes in aqueous solution and their subsequent integration into the structure of the cement matrix.

## **Keywords**

Carbon nanotubes, cement matrix, dispersion, nanotoxicity

### **Bibliografická citace VŠKP**

Kamila Michnová *Studium dispergace uhlíkových nanotrubiček v cementových kompozitech*. Brno, 2015. 33 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně, a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne: 29. 5. 2015

.....

Podpis autora  
Kamila Michnová

**Poděkování:**

Děkuji své vedoucí Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a odborný dohled. Dále děkuji Ing. Tomáši Jarolímovi a Bc. Martinu Labajovi za pomoc při praktické části. Tato bakalářská práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

# Obsah

I. Teoretická část .....	10
1 Úvod.....	10
2 Uhlíkové nanotrubičky (CNT) .....	11
2.1 Výroba uhlíkových nanotrubiček .....	13
2.1.1 Obloukový výboj.....	13
2.1.2 Laserová ablace .....	13
2.1.3 Chemická depozice (CVD = chemical vapor deposition) .....	14
3 Použití CNT v cementových kompozitech .....	15
4 Dispergace uhlíkových nanotrubiček.....	17
4.1 Metodika dispergace.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.2 Povrchově aktivní látky .....	17
4.3 Sledování kvality dispergace .....	18
4.3.1 Optický mikroskop.....	18
4.3.2 Elektronový mikroskop .....	18
4.3.3 Laserová difrakce .....	18
4.3.4 Spektroskopie .....	18
5 Nanotoxicita.....	19
5.1 Druhy nanotoxicity .....	19
5.1.1 Velikost částic .....	19
5.1.2 Povrchové napětí .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
5.1.3 Chemické složení .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
5.1.4 Tvar částic .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
II Praktická část.....	20
6 Cíl práce .....	20
7 Použitý materiál .....	20
8 Použitá zařízení.....	21
8.1 Magnetické míchadlo Variomag Monotherm.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
8.2 Ultrazvukový kavitátor Sonopuls HD 3200 .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
8.3 UV/Vis/NIR Spektrofotometr PerkinElmer LAMBDA 1050 .....	21
8.4 Optický mikroskop .....	21
8.5 Rastrovací elektronový mikroskop TESCAN MIRA3 XM .....	22
8.6 EDS detektor rentgenového záření .....	22



8.7	Další zařízení .....	22
9	Metodika práce.....	23
9.1	Receptura .....	<b>Chyba! Zázložka není definována.</b>
9.2	Příprava vzorků.....	23
9.2.1	Příprava suspenze .....	23
9.2.2	Příprava vzorků na UV/Vis spektroskopii .....	<b>Chyba! Zázložka není definována.</b>
9.2.3	Výroba zkušebních těles.....	23
9.3	Postupy zkoušek .....	23
9.3.1	Optická mikroskopie .....	23
9.3.2	UV/Vis spektrometrie .....	23
9.3.3	Stanovení pevnosti v tahu za ohybu .....	24
9.3.4	Stanovení pevnosti v tlaku .....	25
9.3.5	Rastrovací elektronová mikroskopie.....	25
9.3.6	EDS prvková analýza .....	25
10	Výsledky.....	26
10.1	Optická mikroskopie.....	26
10.2	UV/Vis Spektroskopie .....	26
10.3	Pevnost v tahu za ohybu .....	26
10.4	Pevnost v tlaku.....	27
10.5	Rastrovací elektronová mikroskopie .....	27
10.6	EDS prvková analýza .....	<b>Chyba! Zázložka není definována.</b>
11	Použitá literatura .....	29
12	Seznam příloh.....	33
12.1	Seznam grafů .....	<b>Chyba! Zázložka není definována.</b>
12.2	Seznam obrázků.....	33
12.3	Seznam tabulek.....	33

# **I. Teoretická část**

## **1 Úvod**

Pojem nanotechnologie je v posledních letech často skloňovaným termínem v celé řadě odborných článků z oblasti stavebnictví, techniky a ostatních souvisejících oborů. Nanotechnologie neuniká ani zájmu laické veřejnosti. „Nano“ je v inženýrské praxi běžně známa předpona SI soustavy vyjadřující mocninu  $10^{-9}$ , tj. jednu miliardtinu základní jednotky. Nanotechnologie je pak relativně nový pojem označující technický obor zabývající se cílenou manipulací na úrovni atomů a molekul, která vede k novým umělým strukturám s novými předem danými nebo požadovanými vlastnostmi.

Ačkoli se o nanotechnologii jako oboru hovoří teprve od poloviny 20. století, některé jevy, které bychom dnes mohli označit za nanotechnologie, jsou známy a využívány již velmi dlouhou dobu. Dochovaný římský pohár ze 4. století našeho letopočtu je vyrobený ze sodnovápenatého skla obsahující nanočástice zlata i stříbra a patří mezi nejstarší známý případ nanotechnologie. Nicméně za zakladatele nanotechnologie a jejího možného využití je považován americký fyzik a nositel Nobelovy ceny Richard Feynman, který roku 1959 přednesl přednášku „There’s Plenty of Room at the Bottom“, ve které předpověděl možnost vzniku materiálů a mechanismů na úrovni atomů a molekul s tím, že příroda umí tyto struktury vytvářet a využívat. Avšak zásadní zlom ve výzkumu nanotechnologií přišel v 80. letech minulého století s objevem mikroskopických metod (rastrovací elektronový mikroskop, mikroskop atomových sil), které umožňovaly pozorovat děje na úrovni jednotlivých atomů. [1]

Nanotechnologie v současnosti představují nejdynamičtěji se rozvíjející vědní disciplínu. Její výhodou je, že veškeré změny ve struktuře probíhají na atomární a molekulární úrovni se znatelnými dopady do makrosvěta. Její princip nespočívá pouze ve zmenšení zařízení, ale nabízí hodnotnou změnu vlastností a funkcí oproti shodnému makroskopickému materiálu.

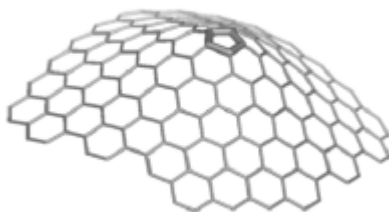
## 2 Uhlíkové nanotrubičky (CNT)

Uhlík patří mezi nejrozšířenější prvky v přírodě a je to také jeden z prvků, který tvoří základní stavební kameny života na zemi. Uhlík se vyskytuje v pevném, kapalném a plynném skupenství. V pevném skupenství má mnoho podob, od měkkého grafitu až po velmi tvrdou diamantovou strukturu. K nově objevené formě pevného uhlíku patří uměle vyrobené uhlíkové nanotrubičky. CNT (z angl. carbon nanotubes) objevil japonský fyzik Sumio Iijima v roce 1991. V posledních dvou desetiletích byly uhlíkové nanotrubičky a jejich vlastnosti podrobně zkoumány a byly vyvinuty různé metody pro jejich výrobu. [1]

Nanotrubičky jsou vyrobeny z makromolekuly uhlíku, které můžeme popsat jako listy grafenu svinuté do válce. Grafen řadíme mezi nejpevnější materiály na světě. Jeho pevnosti jsou více než  $200\times$  větší než u železa a současně je i tvrdší, lehčí a snadno recyklovatelný. [1]

CNT mohou být ve formě jednostěnných uhlíkových trubiček (single walled carbon nanotubes = SWNT), které jsou tvořeny pouze jedním listem grafenu, nebo v podobě víceštěnných uhlíkových nanotrubiček (multi-walled carbon nanotubes = MWNT), které tvoří více plátek grafenu. [2]

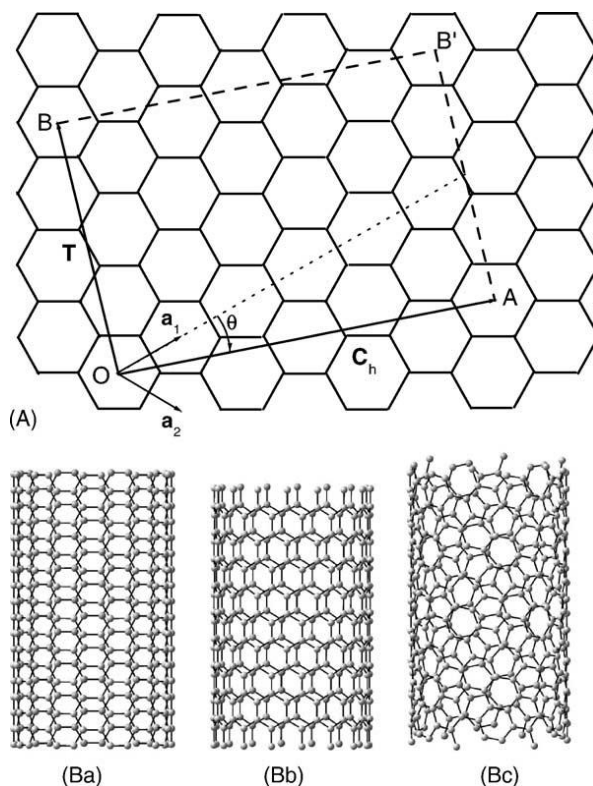
SWNT si můžeme představit jako bezešvé roury tvořené pouze z jedné vrstvy stočeného plátku grafenu, které mohou a nemusí být na koncích uzavřené. Aby mohl být prostorový útvar na obou koncích zcela uzavřený je nutná přítomnost 12 pětiúhelníků, což má za následek zakřivení plochy (Obr. 1). Většina těchto nanotrubiček má průměr kolem 1 – 3 nm a jejich délka může být tisíckrát větší. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**[3]



Obr. 1: Zakřivení plochy vlivem přítomnosti pětiúhelníků [3]

Způsob jakým je trubička stočená může být odlišný, určuje strukturu a tedy i vlastnosti trubičky. Jsou známy tři různé typologie, které závisí na tzv. chirálním vektoru ( $m$ ,  $n$ ). Celá čísla  $m$  a  $n$  značí orientaci šestiúhelníků v trubičce. Je-li  $m = 0$ , vznikají cik-cak trubice

$(0, n)$  a pokud  $n = m$  nanotrubičky nazýváme sedadlová  $(n, n)$ , (z angl. armchair). První dvě struktury mají vysoký stupeň symetrie. Třetí typ, chirální neboli spirálová struktura je nejběžnější a znamená, že struktura může existovat ve dvou zrcadlově odlišných typech. [4]



Obr. 2: Druhy chiralit nanotrubiček, Ba – sedadlová, Bb – cik-cak, Bc - chirální [5]

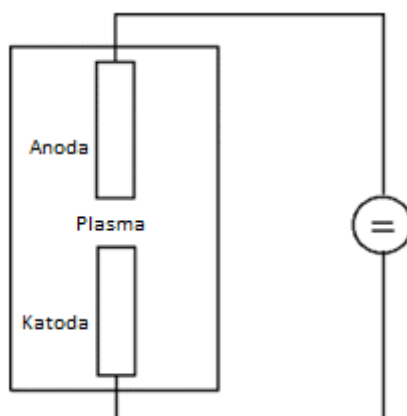
MWNT jsou složeny z několika vrstev plátků grafenu. Jejich vnitřní průměr je od 1 do 10 nm, vnější průměr se pohybuje mezi 2 až 50 nm. Jejich délka může být v řádu  $\mu\text{m}$ . Jednotlivé vrstvy se mohou lišit svou typologií a to znamená, že výsledná mnohostěnná uhlíková nanotrubička je kombinací všech tří typologií. Pro popis struktury můžeme použít dva modely. V modelu matřička jsou listy grafenu uspořádané do soustředných válců tvořených ze SWNT. V druhém modelu je jeden list stočený a tvoří svitek. Mohou mít 5 až 20 vrstev. [3] [6]

## 2.1 Výroba uhlíkových nanotrubiček

Mezi nejrozšířenější metody výroby uhlíkových nanotrubiček patří obloukový výboj, laserová ablace a chemická depozice z plynné fáze. V následující kapitole budou jednotlivé metody výroby podrobně popsány.

### 2.1.1 Obloukový výboj

Je metoda, která se původně používala k syntéze fullerenu C<sub>60</sub> a díky které byly nanotrubičky objeveny. [7] Jde tedy o metodu, která je z hlediska výroby CNT nejstarší. Jedná se o výboj mezi dvěma elektrodami z čistého uhlíku za sníženého tlaku 1333 Pa v plynném médiu (helium, argon, metan) s okolní teplotou. Stejnosměrný proud o velikosti 50 A vytváří vysokoteplotní výboj mezi elektrodami. Výboj odpařuje uhlík z anody a vytváří MWN na katodě, na stěnách aparatury se vytvářejí fullereny. Jako nejvhodnější plyn se ukázal metan. Při jeho použití nedochází k produkci fullerenu a zároveň se vytvářejí MWNT s vysoce kvalitní krystalickou strukturou, s velmi malou produkcí jiných uhlíkových nanočástic. Při výrobě SWNT je do uhlíkové anody přidán kovový katalyzátor (Fe, Ni, Co atd.). SWNT se však vytvoří v podobě sazí na stěnách aparatury. Nejlepší výsledky při výrobě SWNT byly dosaženy při použití dvoukolového Ni-Y katalyzátoru v heliu. [5] [8]

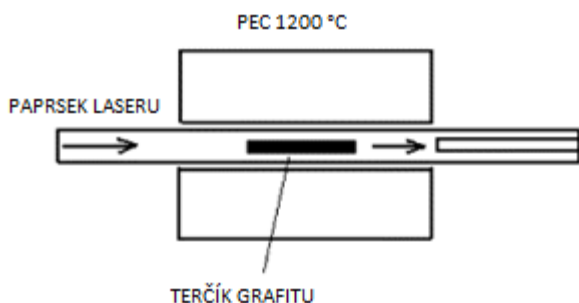


Obr. 3: Obloukový výboj [5]

### 2.1.2 Laserová ablace

Metoda je založena na laserovém rozrušování (ablaci) terčíku grafitu. Terčík je několik hodin zapékaný a tím se tvrdí. Rozrušování povrchu laserem probíhá při teplotě 1200 °C a tlaku 66,5 kPa. Materiál je uvolňován a tvoří se nanotrubičky, které jsou následně odnášeny argonem na chlazený měděný kolektor. Průměr CNT lze kontrolovat prostřednictvím změny

teploty a průtoku argonu. Takto vyrobené CNT jsou velmi kvalitní. Metoda byla poprvé aplikována k syntéze nanotrubiček v roce 1995. [5]

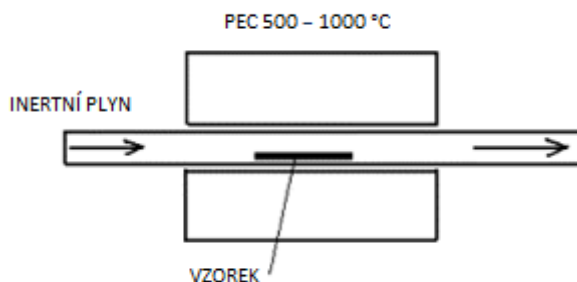


Obr. 4: Laserová ablace [5]

### 2.1.3 Chemická depozice (CVD = chemical vapor deposition)

Princip metody je v rozkladu plynného uhlovodíku za přítomnosti kovového katalyzátoru. Vzniklé CNT metodou CVD jsou méně kvalitní oproti předchozím metodám. K výrobě je potřeba nižších teplot 500 – 1000 °C a vyšších tlaků, takže metoda je ekonomická. Jako další výhoda se jeví její flexibilita ve výrobě CNT. Můžeme použít různé zdroje uhlíků v různých formách a jsme schopni kontrolovat vrstvy nanotrubek. Základní podmínky pro výrobu CNT metodou CVD jsou dostatečná teplota, přítomnost katalyzátoru ve formě kovů, které mají ve fázovém diagramu kov-uhlík konečnou rozpustnost při vysokých teplotách (Fe, Co, Mo, Ni) a přítomnost uhlovodíku ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ). [5] [9]

Zařízení je složeno z křemenné trubice, ve které se nachází substrát a ta je vložena do válcové pece, která udržuje stabilní teplotu. Metoda probíhá za normálního tlaku. Průtokoměry řídí tok uhlovodíků a dalších pracovních plynů. Celý proces je založen na principu vymývání soustavy za pomoci inertních plynů. Současně se soustava vyhřívá na pracovní teplotu. Po dosažení potřebné teploty začíná samotná depozice par. Inertní plyny vystřídá redukční směs, která reaguje s katalyzátorem a to má za důsledek růst nanotrubiček. Po ukončení se nechá aparatura vychladnout opět v inertní atmosféře do doby, kdy teplota neklesne pod 300 °C. Rychlost růstu CNT je obvykle několik nm až  $\mu\text{m}$  za minutu. [5] [9]



Obr. 5: Chemická depozice z plynné fáze [5]

### 3 Použití CNT v cementových kompozitech

Působení uhlíkových nanotrubiček v cementových kompozitech lze zjednodušeně popsat jako působení rozptýlené výztuže. U běžně používaných vláken a drátků s průměrem v řádu milimetrů případně mikrometrů zůstávají i po řádném rozptýlení mezi jednotlivými vlákny relativně velké mezery, ve kterých může docházet ke vzniku a šíření mikrotrhlin. Tyto prostory jsou schopny překlenout uhlíkové nanotrubičky a zastavit tak tvorbu mikrotrhlin díky jejich extrémní neobyčejným mechanickým vlastnostem, kdy je ke vzniku trhlin zapotřebí mnohem více energie. [2]

Následující tabulka srovnává základní vlastnosti uhlíkových nanotrubiček a ocelových drátků.

	<b>Pevnost v tahu [GPa]</b>	<b>Youngův modul pružnosti [GPa]</b>	<b>Objemová hmotnost [kg·m<sup>-3</sup>]</b>
<b>CNT</b>	200	5000	1330
<b>Ocelová drátky</b>	1	210	7850

Tabulka 1: Porovnání vlastností uhlíkových nanotrubiček a ocelových drátků [2]

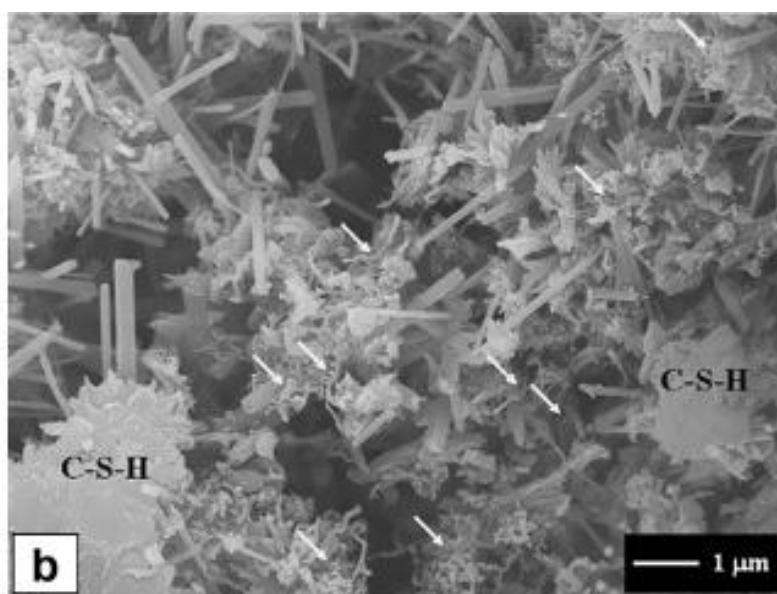
Z tabulky je patrné, že uhlíkové nanotrubičky svými vlastnosti několikanásobně převyšují vlastnosti ocelové rozptýlené výztuže. Při jejich zdárné aplikaci do cementových kompozitů dojde především ke zlepšení níže uvedených vlastností:

- Urychlení hydratace cementu v počátečních stádiích zrání
- Zvýšení pevnosti konstrukce
- Vlivem větší odolnosti betonu vůči chloridům, zvýšení životnosti konstrukce

- Odlehčení konstrukce díky zmenšení profilu
- Zlepšení samozhutnitelných vlastností betonu
- Snížení propustnosti betonu
- Omezení vzniku smršťovacích trhlin
- Snížení spotřeby portlandského cementu

Při nesprávné technologii zpracování betonu nebo při vysokém zatížení mohou vznikat trhliny v místě nejmenšího odporu, které se obvykle nachází v kontaktní zóně mezi C-S-H fází a kamenivem. Tyto trhliny mají zpočátku rozměry v řádu nanometrů, ale postupem času se zvětšují a vedou ke zhoršení užitných vlastností materiálu. Uhlíkové nanotrubičky mohou zabránit vzniku těchto trhlin nebo pozastavit jejich šíření.

Spolupráce uhlíkových nanotrubiček s cementovými hydráty je podmíněna jejich velkým měrným povrchem. CNT jsou schopny vytvořit silné spojení, vedoucí k zamezení šíření trhlin, pouze s nanostrukturou kalcium hydrosilikátového (C-S-H) gelu. Ostatní krystaly hydratačních produktů dosahují mikrometrických rozměrů a to zabraňuje účinnému spojení s uhlíkovými nanotrubičkami. Zlepšení interakce CNT s cementovou maticí můžeme za prvé docílit pomocí zvýšení hutnosti matrice za současného zachování zpracovatelnosti čerstvého betonu. Druhá možnost je, vyvolání že pucolánové reakce, která vede k přeměně mikrokystalických produktů hydratace na CSH gel, který vyplňuje kapilární póry. V neposlední řadě prostřednictvím snížení vodního součinitele pomocí superplastifikátorů, díky čemuž vznikne méně kapilárních pórů. [10]



Obr. 6: SEM snímek CNT (vyznačeny šipkou) a C-S-H fázi



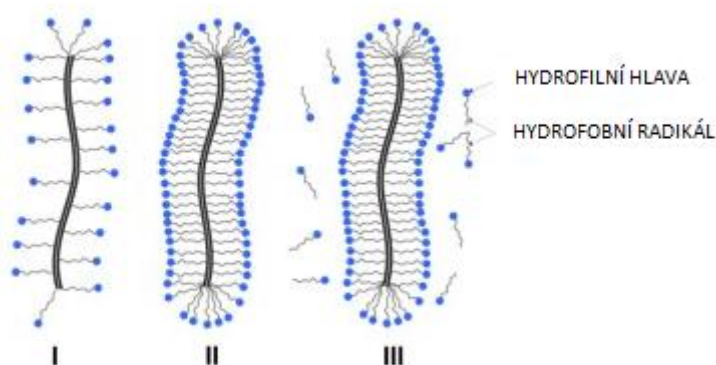
## 4 Dispergace uhlíkových nanotrubiček

Objev uhlíkových nanotrubiček nabízí zajímavé možnosti pro vývoj nových vysokohodnotných materiálů. Jejich správná dispergace je základním parametrem pro jejich vhodné použití. Nanotrubičky mají tendenci k aglomeraci do nežádoucího „mikroplniva“, což je způsobeno jejich vysokým povrchovým napětím. Tyto shluky pak mají za následek snížení mechanických vlastností.

Následující kapitola bude věnována výše popsané problematice. Vhodná dispergace uhlíkových nanotrubiček je klíčový parametr k jejich vhodnému použití. Proto je velmi důležité se správně naučit zacházet s jejich vlastnostmi tak, abychom dosáhli zlepšení vlastností cementové matrice.

### 4.1 Povrchově aktivní látky

Chování surfaktantů lze vysvětlit pomocí teorie tvorby micel. Obrázek 8 znázorňuje mechanismus adsorpce surfaktantu na povrchu nanotrubičky s jeho rostoucí koncentrací. Hydrofobní konec molekuly se adsorbuje na nanotrubičku a hydrofilní konec zapříčiní lepší hydrofilizaci dané micely.



Obr. 7: Teorie tvorby micel u surfaktantů [12]

## **4.2 Sledování kvality dispergace**

### **4.2.1 Optický mikroskop**

Optická mikroskopie se řadí k tradičním a nejrychlejším metodám sledování dispergace. Předpokladem je použití kvalitního mikroskopu a s jeho rozsahem zvětšení se zvyšuje i přesnost měření. Můžeme ale pouze pozorovat shluky nanočástic, nemůžeme sledovat samotné nanočástice. Výsledkem pozorování je pouze tvrzení, zda se v roztoku tyto aglomeráty nacházejí nebo či nikoliv.

### **4.2.2 Elektronový mikroskop**

Podrobnější výsledky poskytuje i elektronová mikroskopie. Oproti optickému mikroskopu je pozorování pomocí rastrovacího (SEM - scanning electron microscope) nebo transmisního (TEM - transmission electron microscope) elektronového mikroskopu mnohem rozmanitější. Poskytuje nám několikanásobně větší zvětšení a velkou hloubku ostrosti, čímž je možné pozorovat částice až na hranici 1 nm, tedy nanočástice samotné. Na základě pozorování lze zjistit povrch, poškození a distribuci nanočástic ve vzorku. Metoda je časově i finančně náročná.

### **4.2.3 Laserová difrakce**

Jde o metodu měřící granulometrii vzorku, která umožňuje měřit nejen velikost částic, ale i kvalitu dispergace. Měření spočívá v hromadném měření částic, které generuje výsledek pro celý vzorek. Podstata metody je založena na kontinuálním průtoku částic. Informace o velikosti a tvaru částic se zobrazí v difrakčním obraze a odtud jsou převedeny na distribuční křivku. Před měřením je důležité stanovit fixní a hledané parametry měření, které souvisí s vlastnostmi měřené látky. Jedná se o metodu rychlou a reprodukovatelnou. [13]

### **4.2.4 Spektroskopie**

UV/Vis spektroskopie je metoda rychlá, přesná, citlivá a experimentálně nenáročná. Na základě těchto vlastností má velmi široké uplatnění. Řadí se mezi optické analytické metody v ultrafialové a viditelné části spektra (200-800 nm). Podstatou metody je absorpce elektromagnetického záření určité vlnové délky. Paprsek, který je vyzařován zdrojem, dopadá na vzorek, který část záření absorbuje. Dále vystupuje ze vzorku a detektorem je indikován. Měřením je stanovena absorbance, kterou lze definovat na základě transmitance jako její záporný logaritmus.[14]

## **5 Nanotoxicita**

Nanotechnologie nabízí velký potenciál pro budoucnost, pokud jde o technologické pokroky v celé řadě průmyslových odvětví. Nicméně přijetí nanotechnologie je závislé na důvěře společnosti k nové technologii. Na tento popud se mezinárodní organizace snaží problematice co nejlépe porozumět s cílem bezpečného nakládání s nanotechnologií a zajistit tak bezpečný vstup na trh. I přes snahu, financování a dobrý úmysl, které jsou zaměřeny na bezpečný rozvoj nanotechnologií je zde stále značná nejistota a pochybnosti. [15]

Výzkumy prokázaly, že nanotoxicita funguje na stejném principu jako toxicita větších částic, tedy například azbestu. Je zde také možnost, že nanomateriály mohou skrývat neznámý způsob toxicity, tedy jakýsi nano-specifický účinek na organismus. Pochopení těchto specifických účinků vedlo k identifikaci několika mechanismů působení nanotoxicity. Doposud však žádné nano-specifické vlivy nebyly zjištěny, což nemusí nevyvracet jejich existenci. [15]

### **5.1 Druhy nanotoxicity**

Existují různé druhy toxicity nanomateriálů, které se odvíjejí od jejich fyzikálně-chemických vlastností. Mezi které patří jejich velikost, povrchové napětí, chemické složení, tvar apod. Nicméně tyto vlastnosti se neřadí mezi nano-specifické, protože jsou již dlouho známé a byla prokázána patogenita u částic, které nespádají do skupiny nanočástic, tedy větších než 100 nm. [15]

#### **5.1.1 Velikost částic**

Vystavení částicím s nízkou rozpustností může docházet k tzv. přetížení plic. To dále může vést k zánětu nebo i ke vzniku nádorového onemocnění. Závažnost dopadu na organismus se odvíjí od měrného povrchu částic. Větší riziko nastává u částic, které jsou rozpustné. Jejich toxicita není způsobená přímo velikostí částic, ale je jakýmsi prostředníkem, kdy jejich malá velikost uspíší vstřebání do krevního systému. [15]

## **II Praktická část**

### **6 Cíl práce**

Cílem praktické části bylo ověření možností dispergace uhlíkových nanotrubiček v cementové maltě pomocí různých surfaktantů. S tím souvisí stanovení kompatibility CNT a surfaktantů a dále jejich vlivu na fyzikálně-mechanické vlastnosti cementových malt. V rámci tohoto experimentu byl proveden návrh dávkování nanotrubiček a surfaktantu, způsob dispergace, metodika zkoušení kvality dispergace a postup výroby zkušebních těles. Ostatní postupy probíhaly dle ČSN EN 196-1 – Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti.

### **7 Použitý materiál**

Uhlíkové nanotrubičky, jako pojivo byl použit balený portlandský cement CEM I 42,5 R dodaný firmou Českomoravský cement, a.s., závod Mokrý.

## 8 Použitá zařízení

### 8.1 UV/Vis/NIR Spektrofotometr PerkinElmer LAMBDA 1050

Spektrofotometr je zařízení, které měří při libovolných vlnových délkách monochromatického světla, nebo je schopen měřit část absorpčního spektra v určitém úseku vlnových délek. Spektrofotometr se skládá ze čtyř částí. Je to světelný zdroj v podobě žárovky nebo výbojky. Dále monochromátor, který umožňuje kontrolu vlnové délky zařízení (interferenční filtr nebo optická mřížka). Místo pro umístění vzorků, které jsou v kyvetách s optickou dráhou, se nazývá kyvetátor a zajišťuje přesnou polohu kyvet. Čtvrtou částí je detektor, zpravidla fotodioda nebo jiný fotoelektrický prvek, sloužící k převodu světelné energie na elektrický signál. [16]

Použitý model LAMBDA 1050 patří mezi nejvýkonnější UV/Vis spektrofotometr americké firmy PerkinElmer. Měří propustnost a odrazivost ve spektrálním rozsahu 175 – 3300 nm s rozlišením menším než 0,05 nm pro UV/Vis spektrum a méně než 0,2 nm pro NIR spektrum. Jako zdroj záření je použita halogenová lampa pro Vis a NIR spektrum a deuteriová výbojka pro UV spektrum. [17]



*Obr. 8: UV/Vis/NIR Spektrofotometr PerkinElmer LAMBDA 1050 [17]*

### 8.2 Optický mikroskop

Pomocí optického mikroskopu můžeme nejrychleji a nejjednodušeji kontrolovat dispergaci uhlíkových nanotrubiček. Prostřednictvím této metody nepozorujeme samotné nanočástice, nýbrž pouze jejich shluky, které se i po dispergaci mohou v suspenzi vyskytovat v mikrometrických rozměrech. Námi použitý mikroskop patřící mezi klasické světelné mikroskopy dosahoval zvětšení až 1000×.

### **8.3 Rastrovací elektronový mikroskop TESCAN MIRA3 XM**

Rastrovací elektronový mikroskop (SEM – scanning electron microscope) funguje na principu zaměření úzkého paprsku elektronů na každé místo sledovaného vzorku. Interakcí dopadajících elektronů s materiálem vzorku vznikají různě detekovatelné složky. Jak paprsek putuje po vzorku, mění se podle charakteru povrchu úroveň signálu v detektoru. Z těchto signálů je pak sestavován výsledný obraz. Přístroj umožňuje pozorovat objekty i menší než 1 nm. [18]

Při měření byl použit mikroskop MIRA3 XM od brněnské firmy TESCAN. Před pozorováním bylo nutné vzorky pozlatit pro zvýšení vodivosti povrchu, to zároveň znemožňuje pozorování uhlíkových nanotrubiček při dispergaci ve vodném roztoku.

### **8.4 EDS detektor rentgenového záření**

EDS detektor (Energy Dispersive Spectrometer) je přístroj, který je součástí elektronového mikroskopu sloužící k prvkové nebo k chemické analýze vzorku. Pro vyhodnocení rentgenového záření je důležitá rychlá a přesná detekce rentgenového záření vystupujícího ze vzorku. EDS analyzátor provádí rozklad rentgenového záření podle energie. Toho dosahuje pomocí interakce zdroje rentgenového zařízení a vzorku. To je založeno na tom, že každý prvek má svou jedinečnou atomovou strukturu, která se nám zobrazí jako peaky v rentgenovém spektru.

Pro měření byl použit systém Quantax XFlash od celosvětové firmy Bruker.

### **8.5 Další zařízení**

Mezi další použitá zařízení patří laboratorní míchačka pro přípravu malt podle ČSN EN 196-1, vibrační stůl BS VIB – 03A pro hutnění čerstvých malt dle ČSN EN 196-1 a ČSN EN 459-2, formy pro výrobu normalizovaných zkušebních těles o rozměrech 40 × 40 × 160 mm, laboratorní váhy s přesností na 0,01 g, analytické váhy s přesností na 0,0001 g, digitální posuvné měřidlo a zkušební zařízení pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku podle ČSN EN 196-1.

## **9 Metodika práce**

### **9.1 Příprava vzorků**

#### **9.1.1 Příprava suspenze**

Metoda dávkování jednotlivých složek byla zvolena následovně:

- Hmotnostní dávkování záměsové vody na laboratorních vahách.
- Hmotnostní dávkování portlandského cementu na laboratorních vahách.
- Hmotnostní dávkování surfaktantu na analytických vahách.
- Hmotnostní dávkování uhlíkových nanotrubiček na analytických vahách.
- Objemové odebrání vzorků na měření absorbance.

#### **9.1.2 Výroba zkušebních těles**

Pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku byla vyrobena zkušební tělesa o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm. Jejich výroba probíhala dle ČSN EN 196-1 následovně:

- Smíchání navážených surovin v normalizované laboratorní míchačce.
- Naplnění ocelových trojforem o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm připravenou cementovou maltou a její zhutnění na vibračním stolku.
- Zakrytí plných forem nepropustným materiálem.
- Po 24 hodinách vyjmutí vzorků z forem a uložení do vodního uložení.

### **9.2 Postupy zkoušek**

#### **9.2.1 Optická mikroskopie**

Cílem sledování vzorku pomocí optického mikroskopu bylo prvotní ověření, zda se v rozdispergované suspenzi nacházejí shluky uhlíkových nanotrubiček.

#### **9.2.2 UV/Vis spektrometrie**

Měřený vzorek byl převeden do jedné z kyvet, druhá byla naplněna srovnávacím roztokem. Naplněné kyvety byly uloženy do komory přístroje, která se následně uzavřela, a pomocí počítače bylo zahájeno měření. Ze stanovených hodnot měření byla vytvořena tabulka s výčtem vzorků a jejich absorbance. Při výměně vzorků byla kyveta nejprve třikrát vypláchnutá destilovanou vodou, následně byla vypláchnutá samotným vzorkem a až poté naplnila. Absorbance byla měřena při vlnové délce 260 nm.

### 9.2.3 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena po 7 a 28 dnech normového zrání dle ČSN EN 196-1. Trámečky o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm se vyjmou z vody nejdříve 15 minut před zkouškou. Vzorky se změří s přesností 0,1 mm.

Trámečky byly uloženy kolmo na směr zhutnění do zkušebního zařízení pro zatížení ve třech bodech. Zatěžuje se až do porušení vzorku rovnoměrně rostoucí silou  $(50 \pm 10) \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ . Výpočet pevnosti v tahu za ohybu se provede dle vztahu:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_t \cdot l}{b^3} [\text{MPa}]$$

kde:

$R_f$  ... pevnost v tahu za ohybu [MPa]

$b$  ... strana čtvercového průřezu trámečku [mm]

$F_t$  ... zatížení vynaložené na střed trámečku při zlomení [N]

$l$  ... vzdálenost mezi podporami [mm]

Pevnost v tahu za ohybu se vyjádří průměrnou aritmetickou hodnotou ze tří jednotlivých výsledků sady tří trámečků, kdy každý výsledek je vyjádřen s přesností 0,1 MPa. Aritmetický průměr se vyjádří s přesností 0,1 MPa.



### 9.2.4 Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena na polovinách trámeček zlomených při stanovení pevnosti v tahu za ohybu. Polovina trámečku se uloží kolmo na směr zhutnění do zkušebního zařízení. Trámečky se až do porušení zatěžují rovnoměrně rostoucí silou  $(2400 \pm 200) \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ . Výpočet pevnosti v tlaku se provede dle vztahu:

$$R_c = \frac{F_c}{A} [\text{MPa}]$$

kde:

$R_c$  ... pevnost v tlaku [MPa]

$F_c$  ... nejvyšší zatížení vynaložené při zlomení [N]

$A = 1600$  ... plocha pomocných destiček  $40 \times 40 \text{ mm}$  [ $\text{mm}^2$ ]

Pevnost v tlaku se vyjádří průměrnou aritmetickou hodnotou ze šesti jednotlivých výsledků sady tří trámeček, kdy každý výsledek je vyjádřen s přesností 0,1 MPa. Odlišuje-li se jeden výsledek ze šesti o více než  $\pm 10 \%$  od jejich průměrné hodnoty vyřadí se a aritmetický průměr se vypočítá ze zbývajících pěti výsledků. Odlišují-li se dva výsledky z šesti o více než  $\pm 10 \%$  od jejich průměrné hodnoty vyřadí se celá sada a zkouška se opakuje. Aritmetický průměr se vyjádří s přesností na 0,1 MPa

### 9.2.5 Rastrovací elektronová mikroskopie

Pro ověření rozměrů čistých uhlíkových nanotrubiček bylo provedeno pozorování pomocí SEM. Pro ověření distribuce nanotrubiček v cementové matici byly pozorovány zlomky trámeček, které byly odebrány po stanovení pevnosti v tlaku.

### 9.2.6 EDS prvková analýza

EDS prvková analýza je metoda, která při tomto experimentu sloužila k prvkové analýze nanotrubiček.

## **10 Výsledky**

V následujících kapitolách budou uvedeny výsledky všech prováděných zkoušek se stručným komentářem.

### **10.1 Optická mikroskopie**

Cílem pozorování bylo zejména ověření dispergace CNT v průběhu ultrasonikace.

Konkrétní výsledky včetně grafického zpracování a obrazové dokumentace jsou uvedeny v neveřejné verzi diplomové práce, která je uložena na Fakultě stavební, Vysoké učení technické v Brně.

### **10.2 UV/Vis Spektroskopie**

Absorbance byla měřena v průběhu dispergace ultrazvukovým kavitátorem u každé suspenze se svým individuálním surfaktantem.

Konkrétní výsledky včetně grafického zpracování a obrazové dokumentace jsou uvedeny v neveřejné verzi diplomové práce, která je uložena na Fakultě stavební, Vysoké učení technické v Brně.

### **10.3 Pevnost v tahu za ohybu**

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu je pro ověření dispergace nanotrubiček v cementových kompozitech velmi důležitá. Jsou-li nanotrubičky vhodně rozdispergovány projeví se to primárně na zlepšení jejich mechanických vlastností.

Konkrétní výsledky včetně grafického zpracování a obrazové dokumentace jsou uvedeny v neveřejné verzi diplomové práce, která je uložena na Fakultě stavební, Vysoké učení technické v Brně.

## **10.4 Pevnost v tlaku**

I když se uhlíkové nanotrubičky primárně nepoužívají pro zlepšení pevnosti v tlaku, nelze jejich vliv přehlédnout. Výsledky jsou uvedeny v Tabulce 12 a grafech 10 a 11.

Konkrétní výsledky včetně grafického zpracování a obrazové dokumentace jsou uvedeny v neveřejné verzi diplomové práce, která je uložena na Fakultě stavební, Vysoké učení technické v Brně.

## **10.5 Rastrovací elektronová mikroskopie**

Cílem pozorování pomocí SEM bylo ověření rozměrů použitých uhlíkových nanotrubiček. A ověřit jejich distribuci v zatvrdlé cementové matrici.

## **11 Diskuze výsledků**

Hlavním cílem práce bylo ověření možností dispergace uhlíkových nanotrubiček pomocí různých surfaktantů. Dále bylo zapotřebí ověření dopadu zakomponovaných uhlíkových nanotrubiček do cementových malt na mechanické vlastnosti betonu ve srovnání s referenčními maltami.

Pro stanovení kvality dispergace byly použity dvě metody, mezi které patří optická mikroskopie a UV/Vis spektroskopie.

Konkrétní výsledky včetně grafického zpracování a obrazové dokumentace jsou uvedeny v neveřejné verzi diplomové práce, která je uložena na Fakultě stavební, Vysoké učení technické v Brně.

## **12 Závěr**

V této bakalářské práci byla shrnuta základní teorie o uhlíkových nanotrubičkách a jejich využitelnost pro stavební průmysl. Úkolem bylo zjistit možnosti dispergace uhlíkových nanotrubiček, jejich použitelnost v cementových kompozitech a v neposlední řadě seznámit se se zdravotními riziky těchto částic.

Cílem experimentální části bylo zjistit kompatibilitu různých povrchově aktivních látek, nejen ze stavebního průmyslu, pro vhodnou dispergaci a udržení stabilní suspenze CNT. Bylo vytvořeno celkem sedm záměsí, kdy každá obsahovala jiný surfaktant. Kvalita dispergace byla ověřena pomocí UV/Vis spektrometrie, optické mikroskopie a pomocí mechanických zkoušek pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku zatvrdlé cementové malty.

Konkrétní výsledky včetně grafického zpracování a obrazové dokumentace jsou uvedeny v neveřejné verzi diplomové práce, která je uložena na Fakultě stavební, Vysoké učení technické v Brně.

### 13 Použitá literatura

- [1] HOŠEK, Jan. Úvod do nanotechnologie. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 170 s. ISBN 978-80-01-04555-8. Dostupné také z: [http://www.nanotechnologie.cz/storage/Hosek\\_Nanotechnologie\\_2010.pdf](http://www.nanotechnologie.cz/storage/Hosek_Nanotechnologie_2010.pdf). Skripta.
- [2] SIČÁKOVÁ, Alena. Nanotechnologie vo vývoji betónu. In: *TZBportál* [online]. 2011 [cit. 2014-04-06]. Dostupné z: <http://www.tzbportal.sk/beton-betonarky/nanotechnologie-vo-vyvoji-betonu.html>
- [3] LHOTÁK, Pavel. Chemie fullerenů [online]. 9/2009 [citováno 2015-04-19]. Dostupné z: [http://www.uochb.cas.cz/Zpravy/PostGrad2004/7\\_Lhotak.pdf](http://www.uochb.cas.cz/Zpravy/PostGrad2004/7_Lhotak.pdf)
- [4] DEKKER, Cees. Carbon Nanotubes as Molecular Quantum Wires. *Physics Today* [online]. 1999, vol. 52, issue 5, s. 22- [cit. 2015-04-11]. DOI: 10.1063/1.882658. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/aip/magazine/physicstoday/article/52/5/10.1063/1.882658>
- [5] Carbon nanotubes: properties and application. 2004. Carbon nanotubes: properties and application [online]. 3(43): 61–102 [cit. 2015-05-15]. DOI: 10.1016 / j.mser.2003.10.001. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X03001268>
- [6] Carbon nanotube. In: [Http://en.wikipedia.org/](http://en.wikipedia.org/) [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon\\_nanotube#Properties](http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube#Properties)
- [7] IIJIMA, Sumio. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature* [online]. 1991, vol. 354, issue 6348, s. 56-58 [cit. 2015-04-11]. DOI: 10.1038/354056a0. Dostupné z: <http://www.nature.com/physics/looking-back/iiijima/index.html>
- [8] IIJIMA, Sumio a Toshinari ICHIHASHI. Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature* [online]. 1993-6-17, vol. 363, issue 6430, s. 603-605 [cit. 2015-04-11]. DOI: 10.1038/363603a0. Dostupné z: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/363603a0>
- [9] JAŠEK, Ondřej. Depozice uhlíkových nanotrubelek metodami PECVD. *Depozice uhlíkových nanotrubelek metodami PECVD* [online]. 2006, s. 49-55 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: [http://vakspol.cz/z/downloads/zpr06\\_1-2.pdf#page=49](http://vakspol.cz/z/downloads/zpr06_1-2.pdf#page=49)
- [10] PEYVANDI, Amirpasha, Libya Ahmed SBIA, Parviz SOROUSHIAN a Konstantin SOBOLEV. Effect of the cementitious paste density on the performance efficiency of carbon nanofiber in concrete nanocomposite. *Construction and Building Materials*

- [online]. 2013, 48: 265-269 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.094. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813006132>
- [11] PEIGNEY, A., Ch. LAURENT, E. FLAHAUT, R.R. BACSA a A. ROUSSET. Specific surface area of carbon nanotubes and bundles of carbon nanotubes. *Carbon* [online]. 2001, vol. 39, issue 4, s. 507-514 [cit. 2015-04-11]. DOI: 10.1016/s0008-6223(00)00155-x. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000862230000155X>
- [12] SOBOLKINA, Anastasia, Viktor MECHTCHERINE, Vyacheslav KHAVRUS, Diana MAIER, Mandy MENDE, Manfred RITSCHER, Albrecht LEONHARDT, Sergiy GRISHCHUK a Ralf SCHLEDJEWSKI. Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2012, vol. 34, issue 10, s. 99-154 [cit. 2015-04-12]. DOI: 10.1007/978-94-007-4246-8\_4. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095894651200162X>
- [13] SOUČASNÉ METODY MĚŘENÍ VELIKOSTI ČÁSTIC FARMACEUTICKÝCH LÁTEK A JEJICH OMEZENÍ. *SOUČASNÉ METODY MĚŘENÍ VELIKOSTI ČÁSTIC FARMACEUTICKÝCH LÁTEK A JEJICH OMEZENÍ* [online]. 2014, č. 108, s. 50-55 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: [http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014\\_01\\_50-55.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014_01_50-55.pdf)
- [14] PAJURKOVÁ, Jana. STUDIUM VLIVU STRUKTURY ORGANICKÝCH BARVIV NA JEJICH ROZKLAD V DIAFRAGMOVÉM VÝBOJI. Brno, 2008. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/7973/Pajurkova\\_Studium%20vlivu%20s%20struktury%20organickych%20barviv%20na%20jejich%20rozklad%20v%20diafragmove%20m%20vyboji.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/7973/Pajurkova_Studium%20vlivu%20s%20struktury%20organickych%20barviv%20na%20jejich%20rozklad%20v%20diafragmove%20m%20vyboji.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [15] Nanotoxicity: challenging the myth of nano-specific toxicity. 2013. DONALDSON, Ken a Craig A POLAND. Nanotoxicity: challenging the myth of nano-specific toxicity [online]. 4(24): 724–734 [cit. 2015-05-15]. DOI: 10.1016/j.copbio.2013.05.003. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958166913001171>
- [16] Spektrofotometrie. In: [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Spektrofotometrie>

- [17] LAMBDA 1050 UV/Vis/NIR Spectrophotometer. PERKINELMER INC. *PerkinElmer: For the better* [online]. 1998-2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.perkinelmer.com/catalog/product/id/L1050>
- [18] Rastrovací elektronový mikroskop. *Cs.wikipedia.org* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Rastrovac%C3%AD\\_elektronov%C3%BD\\_mikroskop](http://cs.wikipedia.org/wiki/Rastrovac%C3%AD_elektronov%C3%BD_mikroskop)
- [19] Energy-dispersive X-ray spectroscopy. *Wikipedia* [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Energy-dispersive\\_X-ray\\_spectroscopy](http://en.wikipedia.org/wiki/Energy-dispersive_X-ray_spectroscopy)



## 14 Seznam příloh

### 14.1 Seznam obrázků

Obr. 1: Zakřivení plochy vlivem přítomnosti pětiúhelníků [5] .....	11
Obr. 2: Druhy chiralit nanotrubiček, Ba – sedadlová, Bb – cik-cak, Bc - chirální [7].....	12
Obr. 3: Obloukový výboj [7] .....	13
Obr. 4: Laserová ablace [7] .....	14
Obr. 5: <i>Chemická depozice z plynné fáze [7]</i> .....	15
Obr. 6: SEM snímek CNT (vyznačeny šipkou) a C-S-H fázi [14].....	16
Obr. 8: Teorie tvorby micel u surfaktantů [19] .....	17
Obr. 12: UV/Vis/NIR Spektrofotometr PerkinElmer LAMBDA 1050 [28] .....	21

### 14.2 Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání vlastností uhlíkových nanotrubiček a ocelových drátků [3] .....	15
--	----